

Détermination expérimentale des coefficients de transfert de masse globale des bois tropicaux afin de prédire les courbes de séchage à basse température

Merlin Simo-Tagne ^{1*}, Romain Rémond ², André Zoulalian ²,
Yann Rogaume ² et Beguide Bonoma ¹

¹ Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Physique Appliquée
B.P. 47, Yaoundé, Cameroun

² Université de Lorraine, LERMaB
B.P. 239–54560, Vandoeuvre les Nancy, France

(reçu le 8 mars 2015 – accepté le 30 septembre 2015)

Résumé - Nous déterminons le coefficient de diffusion globale de masse de cinq bois tropicaux (ayous, iroko, lotofa, sapelli et fraké) venus du Cameroun. Pour cet effet, les cinétiques de séchage issues d'un séchoir solaire et d'un séchoir conventionnel sont utilisées. Une comparaison est ensuite faite entre les valeurs obtenues et celles provenant des bois tropicaux chiliens et tempérés. Il vient que pour les vitesses de séchage comprises entre 0.25 et 1.5 m/s, la température sèche de 33.5 °C et une température humide de 25 °C, les coefficients de diffusion globale de masse sont compris entre 2×10^{-5} et 4×10^{-5} kg/m².s), le séchoir étant conventionnel. Ces valeurs sont conformes à celles trouvées sur les bois tropicaux chiliens et sont moins élevées que celles obtenus sur les bois tempérés. Dans le cas d'un séchoir solaire indirect fonctionnant entre Octobre et Décembre 2004 à Yaoundé, ce coefficient est multiplié presque par 0.1. Il est intéressant dans l'avenir de déterminer une corrélation spécifique aux bois tropicaux d'Afrique de ce coefficient qui tiendra compte des influences de l'humidité relative de l'air, de la température de l'air, de la vitesse de l'air et de l'épaisseur des planches de bois.

Abstract - We determined the global mass diffusion coefficient of five tropical woods (obeche, iroko, lotofa, sapelle and frake) coming from Cameroun. In this effect, drying kinetics using a solar dryer and a conventional dryer are utilized. In addition, comparison is oing between the values obtained and these coming from Chileans tropical woods and temperate. Thus, when the drying kinetics are between 0.25 to 1.5 m/s, dry temperature equal to 33.5 °C and wet temperature equal to 25°C, global mass diffusion coefficient are between 2×10^{-5} and 4×10^{-5} kg/(m².s), for the conventional dryer. These values are conform to these obtained on the Chilean tropical woods and less than these obtained on the temperate woods. In the case of an indirect solar dryer functioning between October and November 2004 at Yaoundé, this coefficient is nearly multiplied by 0.1. In the future, it is interesting to determine a specific correlation on the African tropical woods of this coefficient with the influences of air relative humidity, air temperature, air kinetic and the thickness of the wood planks.

Mots clés: Bois tropicaux - Séchoir solaire - Séchoir conventionnel - Forêt - Conservation - Cameroun.

1. INTRODUCTION

L'exploitation du bois contribue significativement à l'essor financier des pays tropicaux. Pour ce qui est du Cameroun, le bois est après le pétrole le produit le mieux exporté tant en volume qu'en prix de vente. Aussi, le marché intérieur trouve sa satisfaction en ce sens que le bois est utilisé dans la mise en œuvre des outils et est toujours utilisé dans la construction des habitats, aussi bien durant le chantier que dans leurs usages. Le Programme Sectoriel Forêt Environnement (PSFE) est un outil mis sur

* simotagne2002@yahoo.fr

pied par le Cameroun afin de mieux gérer son patrimoine forestier et pour s'entérier aux exigences internationales. Il est estimé que les 70 % du volume de bois qui entre dans les scieries au Cameroun sont perdus sous forme de déchets entre autres, sans oublier que la moitié de l'arbre représentée par les branches, les cimes, les souches, les coursons et les racines est abandonnée en forêt [1].

Le décret N°99/781/PM du 13 Octobre 1999 impose une interdiction d'exporter treize espèces de bois du Cameroun sous forme de grumes parmi lesquelles, on peut citer le bubinga, le doussié, le fromager, l'illonga, l'iroko, le moabi, le padouk, le sapelli et le wengé. Ainsi, il est d'une importance incontestée de développer les connaissances thermophysiques et chimiques des bois récoltés afin d'améliorer leurs techniques de conservation comme le séchage conventionnel et solaire, donc d'optimiser la gestion des produits biologiques forestiers.

S'il ne fait aucun doute que la caractérisation du bois est très diffusée dans la littérature, les résultats ne sauraient se généraliser aux bois tropicaux à cause des différences qui sont distinguées à l'échelle microscopique entre les bois tempérés et ceux tropicaux, et même entre les bois de même type [2]. La connaissance des coefficients de diffusion massique des matériaux biologiques permettent d'estimer leurs durées de séchage tout en donnant des possibilités d'optimiser la consommation de l'énergie lors du processus du séchage et offrir les possibilités de multiplier les techniques de séchage au vue de la valorisation technologique du bois.

Aussi, l'étude du confort thermique des maisons à ossature bois est aisée. Dans cette publication, nous déterminons expérimentalement les coefficients de diffusion globale massique de cinq bois tropicaux du Cameroun: ayous, sapelli, iroko, lotofa et fraké. Ce coefficient est déterminé dans la littérature sur le hêtre, l'épicéa et le coïgue [3-6].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Séchage conventionnel

Aussitôt à la fin du séchage, on a extrait deux échantillons de 2 cm d'épaisseur par essence dans le sens de la longueur, chaque échantillon étant situé à 10cm de chaque extrémité. Ensuite chaque échantillon a été identifié, pesé et introduit dans l'étuve à dessiccation réglée à 103 °C afin de déterminer, après 24 h de séchage, la masse anhydre de chaque échantillon [7]. Les moyennes de chaque teneur en eau (par essence) permettent d'obtenir la teneur en eau finale par essence et de déduire la masse anhydre de chaque planchette utilisée. Pour chaque espèce, le calcul suivant est utilisé pour déterminer la masse anhydre de la planche:

$$X_f = \frac{X_{f_1} + X_{f_2}}{2} \quad (1)$$

$$M_0 = \frac{100 M_f}{X_f + 100} \quad (2)$$

Avec M_f , dernière masse mesurée de la planche aussitôt avant le retrait de l'étuve et M_0 , masse anhydre de la planche.

Les dimensions et les caractéristiques physiques des bois sont données au **Tableau 1**.

Les figures 1 et 2 ci-dessous présentent respectivement le séchoir et les échantillons dans le séchoir.

La figure 3 présente l'étuve à dessiccation utilisée pour rendre anhydre nos échantillons. La figure 4 présente les températures sèches et humides utilisées.

Tableau 1: Caractéristiques des planches utilisées, séchage conventionnel

Essences	Dimensions (cm)	Type de débit	Direction anatomique
<i>Ayous</i>	36.5 × 11.7 × 2.5	Dosse	Radiale
<i>Fraké</i>	43 × 10.8 × 2.4	Quartier	Tangentielle
<i>Sapelli</i>	43 × 8.8 × 2.2	Quartier	Tangentielle
<i>Lotofa</i>	43 × 7 × 2.4	Quartier	Tangentielle

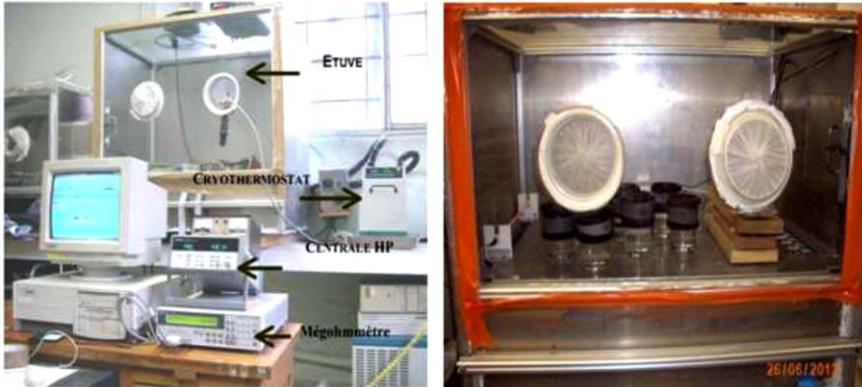


Fig. 1: Equipage et séchoir (étuve) à atmosphère très contrôlée

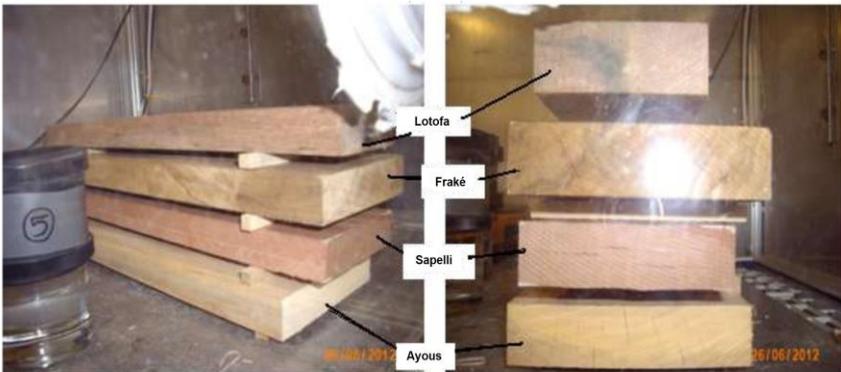


Fig. 2: Disposition des planches lors de l'étude de la cinétique de séchage à atmosphère constante



Fig. 3: Etuve à dessiccation

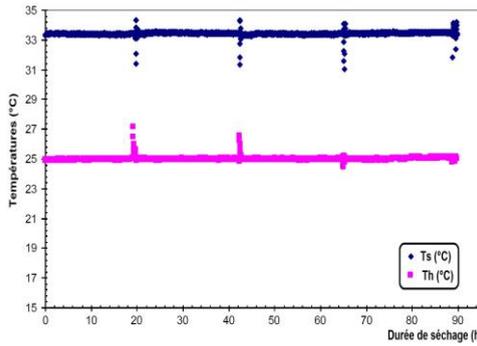


Fig. 4: Evolutions des températures sèche (T_s) et humide (T_h) lors du séchage à atmosphère constante

2.2 Séchage solaire

Le séchoir solaire utilisé annoté est décrit sur la figure 5. Les parois sont en polyéthylène. Le séchoir est utilisé en Octobre-Novembre 2004 pour l’ayous et le sapelli, et en Novembre-Décembre 2004 pour l’iroko dans la ville de Yaoundé-Cameroun. Le **Tableau 2** présente les planches utilisées ici.

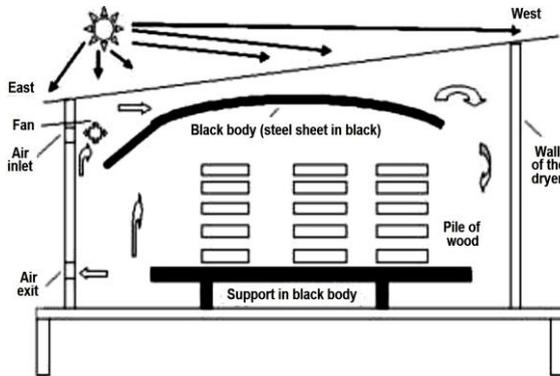


Fig. 5: Séchoir solaire indirect utilisé au Cameroun (Capacité: 4 m³; Ventilation: 1.5 m/s)

Tableau 2: Caractéristiques des planches utilisées, séchage solaire

Essences	Dimensions (cm)	Type de débit	Direction anatomique
<i>Ayous</i>	5 × 35 × 220	Quartier	Tangentielle
<i>Iroko</i>	5 × 40 × 210	Quartier	Tangentielle
<i>Sapelli</i>	5 × 35 × 220	Quartier	Tangentielle

2.3 Méthode de détermination

Nous nous sommes intéressés aux points du séchage où la phase de mise en température est achevée. Lorsque cette phase est amorcée, la relation (3) est vérifiée où X est la teneur en eau, X_{eq} la teneur en eau à l’équilibre, S la surface de transfert de l’humidité, t la durée de séchage et K le coefficient de diffusion globale de masse.

$$-M_0 \frac{dX}{dt} = K \cdot S \cdot (X - X_{eq}) \tag{3}$$

Ainsi, on suppose que K est constant dans l'espace et le temps, ce qui permet d'avoir la relation (4) où t_t est l'instant où la mise en température du bois est achevée, X_t étant la teneur en eau du bois à cet instant.

$$-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = \frac{K \cdot S}{M_0} t(\text{h}) - \frac{K \cdot S}{M_0} t_t(\text{h}) \tag{4}$$

Ainsi, le tracé de la fonction $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = f(t)$ permet de déduire le paramètre recherché K qui est fonction des conditions aérauliques et thermophysiques de l'air de séchage, en plus des caractéristiques du bois. Une fois les paramètres déterminés, la cinétique de séchage est obtenue suite à la relation (5).

$$X = X_{\text{eq}} + (X_t - X_{\text{eq}}) \times \exp\left(-\frac{K \cdot S}{M_0} (t - t_t)\right) \tag{5}$$

La validation de la corrélation est faite à partir du carré du coefficient de corrélation R^2 et de l'écart relatif donné par la relation (6).

$$E(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{\text{expéri}_i} - X_{\text{théo}_i}|}{X_{\text{expéri}_i}} \tag{6}$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Séchage conventionnel

La figure 6 présente les courbes expérimentales obtenues.

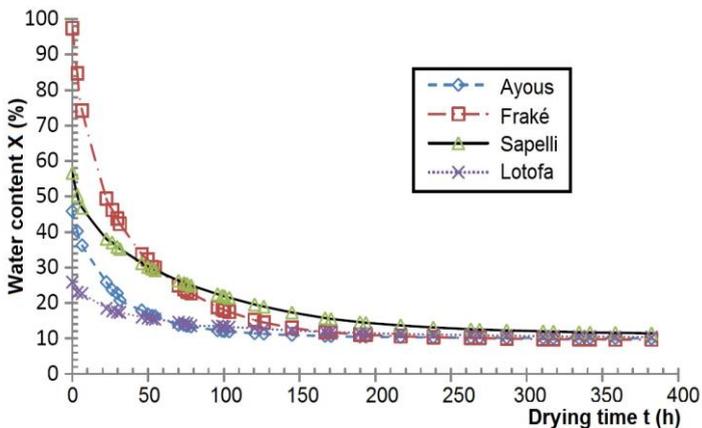


Fig. 6: Evolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage

Le tracé de la courbe $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = f(t)$ présenté à la figure 7, permet de

mettre en évidence la phase où la mise en température est achevée. Nous avons pris l'espace temps situé entre 20 h et 125 h du séchage.

Le **Tableau 3** présente les paramètres des bois obtenus. Les relations (7) présentent les équations obtenues avec les différents carrés de corrélation dont les valeurs sont satisfaisantes, témoignant de la concordance de la méthode.

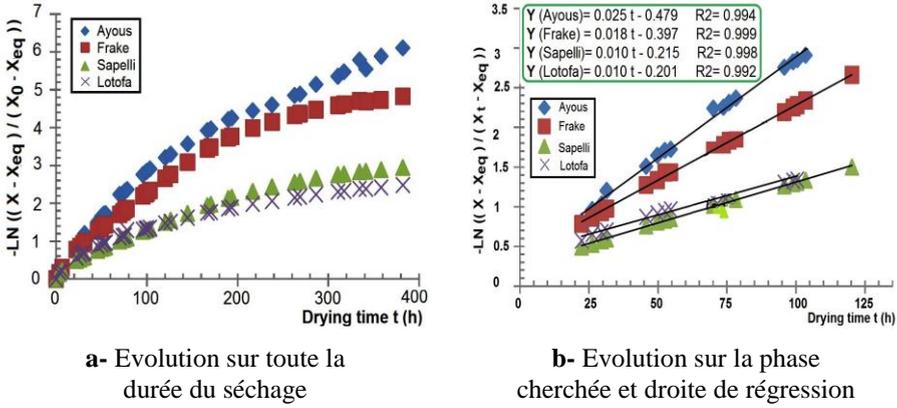


Fig. 7: $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = f(t)$

Tableau 3: Paramètres obtenus, séchage conventionnel

Paramètres	Ayous	Lotofa	Sapelli	Fraké
M_1 , (g)	696.6	622.73	849	1048.25
M_0 , (g)	475.386	494.575	541.798	530.727
$S_b = 2S_{b1}$ (cm ²)	854.1	602	746.8	928.8
X_0 (%)	45.90	25.91	56.73	97.51
X_t (%)	25.9	18.54	38.13	49.49
X_{eq} (%)	10	10	10	10
X_{first} (%)	12.07	13.43	19.04	14.55

Ayous, $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = 0.025t(\text{h}) - 0.479$ avec $R^2 = 0.994$ (7a-)

Frake, $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = 0.018t(\text{h}) - 0.397$ avec $R^2 = 0.999$ (7b-)

Lotofa, $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = 0.010t(\text{h}) - 0.201$ avec $R^2 = 0.992$ (7c-)

Sapelli, $-\text{Ln}\left(\frac{X - X_{\text{eq}}}{X_t - X_{\text{eq}}}\right) = 0.010t(\text{h}) - 0.215$ avec $R^2 = 0.998$ (7d-)

Le **Tableau 4** présente les coefficients de diffusion globale de masse de nos résultats obtenus avec des écarts, lorsque seuls sont confrontés les points expérimentaux après le temps de mise en température (E_1 (%)) et lorsque toute la durée de séchage est considérée (E_2 (%)).

Il vient que les points expérimentaux sont mieux définis après la phase de mise en température du bois. En plus, moins le bois est dense, plus élevé est le coefficient de diffusion globale. Il est difficile de dégager un lien entre la durée de mise en température et la densité de nos bois, mais il est clair que l'ensemble se situe entre 19 et 22 h de séchage.

Tableau 4: Coefficients de diffusion globale massique obtenus

Paramètres	Ayous	Lotofa	Sapelli	Fraké
t_t , (h)	19.16	20.10	21.50	22.06
$K \cdot 10^5$, (kg/m ² s ²)	3.865	2.282	2.015	2.857
E_1 (%)	2.065	2.276	3.308	5.744
E_2 (%)	3.272	3.343	4.201	7.126

Tableau 5: Coefficients de diffusion globale de masse et conditions de séchage du coigüe chilien *Nothofagus dombeyi* durant le séchage conventionnel [3]

Cycle	Constants					
	G (kg/s)	e (m)	S (m ²)	M _B (kg)	T _{in} (°C)	W _{in} (kg/kg)
1	0.3037	0.0184	10.6	50.6	65	0.0359
2	0.6116	0.0217	11.5	61.1	64	0.0359
3	0.3058	0.0296	12.0	83.3	67	0.0530
4	0.6116	0.0308	12.4	87.5	66	0.0474

Cycle	Variables (initial values)				Global coefficients
	MC (%)	W _{out} (kg/kg)	T _{out} (°C)	T _w (°C)	$K \cdot 10^5$ (kg/m ² s ²)
1	107.5	0.0359	60	52	3.17
2	104.1	0.0359	60	17	3.18
3	107.7	0.0531	58	47	2.06
4	107.5	0.0474	62	35	1.87

Tableau 6: Coefficients de diffusion globale de masse et conditions de séchage de plusieurs espèces de bois durant le séchage conventionnel [4]

Wood Species	e (mm)	T _w (°C)	T _w (°C)	v (m/s)	$K \cdot 10^5$ (kg/m ² s ²)
Spruce	18	70	50	3	12.5
Spruce	27	70	50	3	7.48
Spruce	41	70	50	3	6.39
Beech	30	70	50	2	5.21
Beech	30	70	50	5	7.81
Coigüe	38	60	44	2.5	0.43

Les **Tableaux 5** et **6** montrent que le bois tropical du Chili (coigüe) a les coefficients de diffusion globale de masse proche de nos bois, les températures de séchage utilisées par les auteurs étant presque le double de nos températures et les épaisseurs variant entre 18 et 38 mm. Il est clair de rappeler que nos échantillons ont une épaisseur moyenne de 24 mm.

En regardant les cycles du **Tableau 5**, on constate que l'épaisseur du bois a une influence importante sur le coefficient de diffusion globale de masse des bois. Le **Tableau 6** montre que les coefficients de diffusion globale de masse des bois tempérés seraient supérieurs au double de ceux des bois tropicaux montrant le séchage rapide des bois tempérés.

Les figures 8 et 9 montrent les évolutions des cinétiques de séchages modelées et expérimentales de nos bois. On constate une bonne représentation des courbes expérimentales après les instants de mise en température, mais aussi au-delà de 125h de séchage qui est la limite supérieure utilisée pour estimer les coefficients.

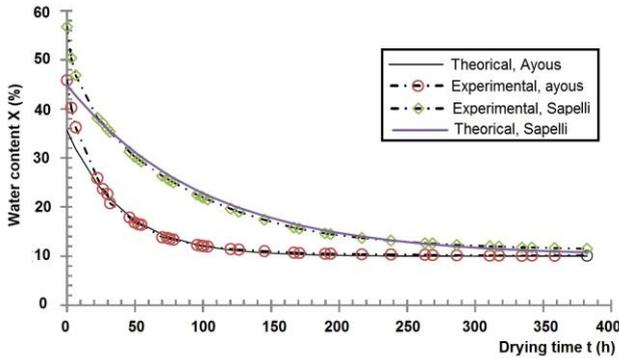


Fig. 8: Courbes théoriques et expérimentales de nos bois (ayous et sapelli)

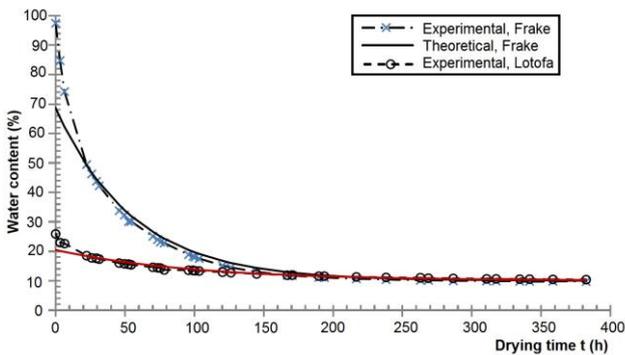


Fig. 9: Courbes théoriques et expérimentales de nos bois (fraké et lotofa)

3.2 Séchage solaire

Dans le cadre du séchage solaire, les caractéristiques de l'air dépendent du jour, du mois et de l'heure du jour [8, 9]. Celles-ci sont donc variables, ce qui engendre des éventuelles variations irrégulières de la cinétique de séchage. La visualisation des courbes expérimentales nous a permis de distinguer plusieurs fragments dans les cas de l'ayous et du sapelli, ce qui n'est pas le cas pour le bois d'iroko où une seule courbe satisfait la description des points expérimentaux. Les relations (8), (9) et (10) permettent de corréler les cinétiques expérimentales. Les carrés des coefficients de corrélation montrent que la méthode est adaptée. Les figures 10, 11 et 12 présentent les cinétiques expérimentales des bois étudiés. Il ressort que les courbes modélisées traduisent bien les courbes expérimentales.

Ayous

$$t \leq 264 \text{ h}, \quad -\text{Ln} \left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) = 0.004 \cdot t(\text{h}) \quad R^2 = 0.993 \quad (8a-)$$

$$t \geq 264 \text{ h}, \quad -\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = 0.013.t(\text{h}) - 185,15 \quad R^2 = 0.95 \quad (8b-)$$

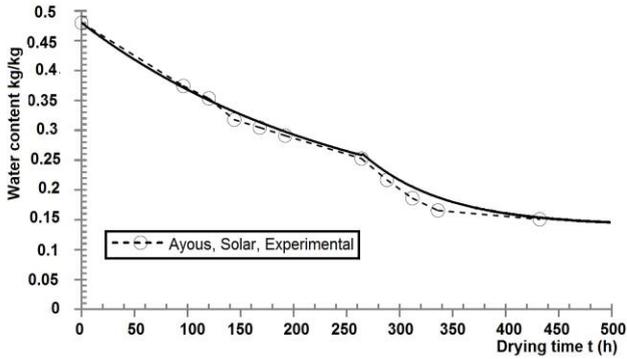


Fig. 10: Cinétique de séchage solaire de l'ayous
29/10/04 au 15/11/04 à Yaoundé

Sapelli

$$t \leq 360 \text{ h}, \quad -\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = 0.002.t(\text{h}) \quad R^2 = 0.95 \quad (9a-)$$

$$t \geq 360 \text{ h}, \quad -\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = 0.018.t(\text{h}) - 327,17 \quad R^2 = 0.913 \quad (9b-)$$

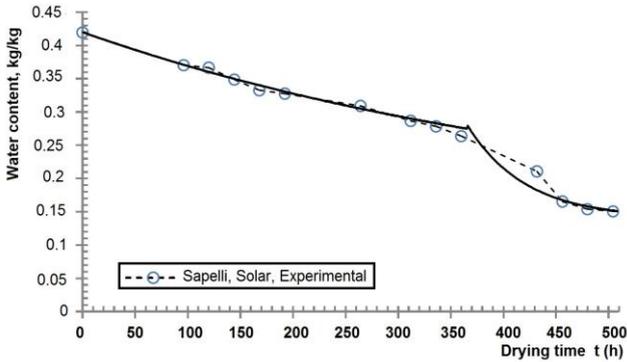


Fig. 11: Cinétique de séchage solaire du sapelli
29/10/04 au 18/11/04 à Yaoundé

Iroko

$$\forall t \geq 0, \quad -\ln\left(\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}\right) = 0.006.t(\text{h}) \quad R^2 = 0.982 \quad (10)$$

Le **Tableau 7** présente les masses (anhydre et initiale) des planches, les écarts relatifs et les coefficients de diffusion globale de masse obtenus. On note que la présence de plusieurs fragments sur les courbes vient du fait que chaque modification de température engendre des nouvelles périodes de mises en température.

Malgré les températures élevées, on constate que dans le cas du séchage solaire, le coefficient de diffusion est de l'ordre de 10^{-6} . Ceci serait dû à l'épaisseur des planches utilisées qui est de 50 mm, donc le double des planches utilisées lors du séchage conventionnel.

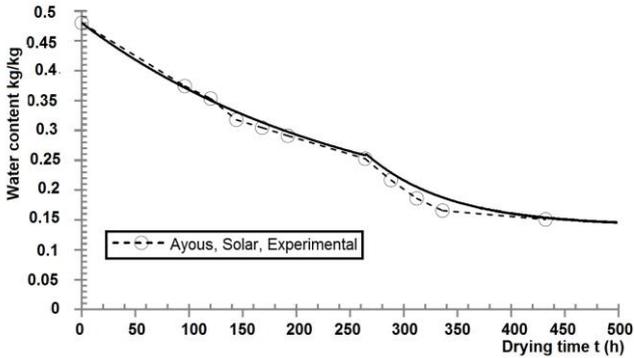


Fig. 12: Cinétique de séchage solaire de l'Iroko.
22/11/04 au 12/12/04 à Yaoundé

Tableau 7: Coefficients de diffusion globale massique des planches

Paramètres	Ayous		Sapelli		Iroko $\forall t \geq 0$
	$t < 264h$	$t \geq 264h$	$t < 360h$	$t \geq 360h$	
Température	$50 \leq T \leq 65^\circ C$		$50 \leq T \leq 65^\circ C$		$50 \leq T \leq 65^\circ C$
M_i , (kg)	5.024		13.83		15.75
M_0 , (kg)	3.3947		9.7394		11.121
$K \cdot 10^5$ (kg/m ² s ²)	2.4495	7.9609	3.5135	31.622	11.033
E (%)	4.0492		2.2756		2.7548

Pour mieux corréliser les coefficients de diffusion globale de masse des bois avec les paramètres du bois et de l'air asséchant, les auteurs [5, 6] ont établi la relation (11) où les paramètres a_0 , b_0 , c_0 et p sont à déterminer en fonction des espèces de bois.

$$\frac{1}{K} = a_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_a}\right) e + b_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_a}\right) V^{-p} \cdot \exp\left(-\frac{1 - \frac{RH}{100}}{X_{fs_p} - X_{eq}}\right) \quad \dots(11)$$

e est l'épaisseur du bois, V la vitesse de l'air, RH l'humidité relative de l'air, T_a la température de l'air, X_{fs_p} la teneur en eau du bois au point de saturation des fibres et X_{eq} la teneur en eau du bois à l'équilibre. Cette relation montre que le coefficient de diffusion globale de masse ne peut pas être multiplié du coefficient 0.1, lorsque l'épaisseur des planches double.

Ainsi, le séchage solaire donne des coefficients de diffusion globale de masse plus faible que ceux donnés par le séchage conventionnel. Une étude expérimentale sur chaque espèce est alors nécessaire pour s'en convaincre et fixer les idées. Les études [5, 6] donnent les résultats du **Tableau 8** et qui montrent que les paramètres de l'équation (11) dépendent de l'espèce étudiée.

Tableau 8: Paramètres de l'équation (11) donnés dans la littérature

Paramètres	[5]	[6]
a_0 (ms/kg)	0.12	0.2265
b_0 (m ² /kg)	23.9	268.9
c_0 (K)	2683	2543.6
p	0.8	2.7158

4. CONCLUSION

1. La méthode simplifiée est efficace pour décrire les cinétiques de séchage des bois tropicaux du Cameroun. Mais seulement, il est nécessaire de s'intéresser à la phase où la mise en température du bois est achevée pour le séchage conventionnel.
2. Les coefficients de diffusion globale de masse des bois tropicaux Chiliens sont du même ordre que ceux trouvés sur les bois d'étude. Ceux-ci sont compris entre 2×10^{-5} et 4×10^{-5} kg/(m².s), lorsque le séchoir est conventionnel avec les vitesses de séchage comprises entre 0.25 et 1.5 m/s, l'épaisseur des planches entre 24 et 30 mm, la température sèche de 33.5°C et une température humide de 25 °C. Pour le séchage solaire à Yaoundé entre octobre et décembre, ce coefficient est de l'ordre de 10^{-6} kg/(m².s) pour des planches de 50 mm d'épaisseur.
3. Plus le bois est dense, plus le coefficient de diffusion globale de masse diminue. Ce coefficient diminue aussi lorsqu'augmente l'épaisseur du bois.
4. En général, les coefficients trouvés sont moins importants que ceux obtenus sur les bois tempérés, les valeurs sur le hêtre tirées de la littérature représentant les bois tempérés ici.
5. Une étude spécifique pour tenir compte des influences aérauliques et thermo physiques du bois et de l'air de séchage des bois tropicaux d'Afrique est utile afin d'avoir des résultats aptes au séchage à caractéristiques d'air variables pour tenir compte de la réalité industrielle et du processus du séchage solaire.

Remerciements- L'auteur principal remercie profondément l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) pour le financement du présent travail à travers le programme de bourse OIBT. Je remercie aussi le technicien Tristan Stein du LERMAB (Epinal), Université de Lorraine, pour toute l'assistance lors du montage de mes protocoles expérimentaux durant mon stage de Post Doctorat.

REFERENCE

- [1] GTZ, 'Note Technique sur le Bois Energie au Cameroun', 2006.
- [2] M. Simo-Tagne, 'Experimental Characterization of the Influence of Water Content on the Density and Shrinkage of Tropical Woods Coming from Cameroon and Deduction of their Fiber Saturation Points', International Journal of Science and Research, Vol. 3, N° 6, pp. 510 - 515, 2014.
- [3] M. Alvear, W. Broche, C. Salinas and R.A. Ananias, 'Drying Kinetic of Chilean Coigüe: Study of the Global Drying Coefficient', 8th International IUFRO Wood Drying Conference, pp. 383 - 387, 2003.
- [4] R.A. Ananias, L. Chrusciel, A. Zoulalian, C. Salinas-Lira and E. Mougel, 'Overall Mass Transfer Coefficient for Wood Drying Curves Predictions, Mass Transfer in Multiphase

Systems and its Applications’, Prof. Mohamed El-Amin (Ed.), ISBN: 978-953-307-215-9, In Tech, Available from:

<http://www.intechopen.com/books/mass-transfer-in-multiphase-systems-and-its-applications/overallmasstransfer-coefficient-for-wood-drying-curves-predictions>, 2011.

- [5] R.A. Ananías, E. Mougél and A. Zoulalian, ‘*Introducing an Overall Mass-Transfer Coefficient for Prediction of Drying Curves at Low Temperature Drying Rates*’, Wood Science and Technology, Vol. 43, N°1, pp. 43 - 56, 2009.
- [6] L. Chrusciel, E. Mougél, A. Zoulalian and T. Meunier, ‘*Characterization of Water Transfer in a Low Temperature Convective Wood Drier: Influence of the Operating Parameters on the Mass Transfer Coefficient*’, Holz Roh Werkstoff, Vol. 57, pp. 439 - 445, 1999.
- [7] Norme française, ‘*Bois- Conditions Générales d’Essais- Essais Physiques et Mécaniques*’, 1985.
- [8] N. Bekkioui, A. Zoulalian, A. Hakam, F. Bentayeb and A. Sesbou, ‘*Modelling of a Solar Wood Dryer with Glazed Walls*’, Maderas Ciencia y Tecnología, Vol. 11, N°3, pp. 191 - 205, 2009.
- [9] F. Bentayeb, N. Bekkioui and B. Zeghmati, ‘*Modelling and Simulation of a Wood Solar Dryer in a Moroccan Climate*’, Renewable Energy, Vol. 33, N°3, pp. 501 - 506, 2008.